

УДК 530

ДВА МЕХАНИЗМА АЭРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ОБТЕКАНИЯ В ВОЗДУХЕ*

© 2018 г. Герасимов С.И.^{1,2,3,4}, Ерофеев В.И.^{3,5},
Кикеев В.А.^{3,4}, Фомкин А.П.², Яненко Б.А.¹, Герасимова Р.В.¹

¹Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров,
Российская Федерация

²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-
исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация

³Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального
исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской
академии наук», Нижний Новгород, Российская Федерация

⁴Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация

⁵Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

s.i.gerasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2018

Рассматриваются вопросы организации защиты Земли от столкновения с космическими объектами. Проанализирована эффективность различных способов дробления космических объектов с целью ослабить опасные последствия от их падения на Землю. В рамках проблемы решалась задача экспериментального исследования аэротермомеханического уноса на начальном участке разгона модели метеорита при гиперзвуковых скоростях в условиях интенсивного фонового излучения. На основании рентгеновских снимков и фотоснимков движения тела в атмосфере Земли при гиперзвуковых скоростях предложена качественная картина аэротермомеханического уноса и торможения стальных шариков и шариков, изготовленных из композитного сплава вольфрам–никель–железо. Показано, что характер процессов, наблюдаемых при полете стальных шариков и шариков из композитного сплава, различен. Во время полета под действием аэродинамического теплового потока (конвективного и излучения) происходит интенсивный нагрев лобовой поверхности объектов, начинается унос материала, обуславливающий изменение массы и обводов. При продвижении от полюсного участка лобовой поверхности по потоку происходит снижение уровня тепловых нагрузок и, соответственно, остывание пленки. Поэтому возрастает вязкость расплава, скорость течения пленки падает, и происходит формирование наплыва. Накапливающийся рас-

* Выполнено в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013–2020 гг. по теме №0035–2014–0402 (номер госрегистрации 01201458047) и при поддержке РФФИ (гранты №№17–08–01096, 18–08–00715).

плав периодически срывается с поверхности тела. По мере торможения тепловые потоки снижаются, унос прекращается, и в дальнейшем обводы объектов уже не меняются, а температура поверхности падает. У стальных шариков унос проходит из-за проплавления наружного слоя и сброса капель. У шариков из сплава вольфрам–никель–железо механизм уноса связан с разными температурами плавления компонентов и приводит к движению вольфрамовых частиц в направлении, нормальном к направлению полета тела.

Ключевые слова: аэротермомеханический унос, аэробаллистический эксперимент, рентгенографирование.

Начиная с 1980-х годов мировое сообщество уделяет серьезное внимание вопросам, связанным с возможными последствиями встречи Земли с крупными астероидами и кометами [1–8]. Осознание такого рода опасности требует организации защиты Земли от столкновения с космическими объектами. Есть мнение, что наиболее эффективным средством такой защиты является разрушение каменных и железосодержащих космических объектов с помощью ядерных взрывов [9–13], особенно если это касается тел диаметром более 30 м. При этом предполагается, что ядерные боеприпасы (ЯБП) могут быть заблаговременно сосредоточены на орбитальных платформах. Однако вероятность возникновения аварийных ситуаций с ЯБП не меньше, чем вероятность столкновения астероида с Землей. Поэтому наряду с разработкой проектов использования ЯБП для борьбы с астероидной опасностью актуальной является задача поиска альтернативных решений. В частности, разрушить космический объект можно не только с помощью ядерного взрыва, но и в результате столкновения с ним другого объекта. Представляется, что кинетический способ разрушения малых астероидов является наиболее приемлемым.

Некоторые специалисты [14–18] считают, что если величина приложенной к астероиду нагрузки достигнет критического значения напряжения разрушения, то по телу астероида побежит волна дробления и за время $\sim D/C$ (D – диаметр астероида, C – объемная скорость звука в материале астероида) материал космического тела потеряет связность (оно будет разрушено). Согласно [15], при движении в атмосфере Земли раздробленная масса астероида становится близкой по свойствам к жидкости, растекается и уносится потоком.

Известно, что для разрушения монолитной преграды наиболее эффективным является заглубленный взрыв. С учетом этого факта может быть принята концепция создания кинетического ударника, содержащего в своем составе взрывчатое вещество, проникающего в толщу опасного космического объекта (ОКО) и осуществляющего его фрагментацию за счет взрыва на заданной глубине и в заданный момент времени.

Вопрос о необходимой степени фрагментации должен решаться с учетом того, что атмосфера Земли в значительной степени выполняет функции защиты от столкновения с ОКО. Ее защитные функции обусловлены тем, что движение в плотных слоях атмосферы ОКО (болида) сопровождается следующими процессами:

- последовательным разрушением (фрагментацией) под действием развивающегося на его поверхности высокого давления;
- аэротермомеханическим поверхностным разрушением, уносом массы ОКО и разделением его на отдельно летящие фрагменты;
- интенсивным торможением фрагментов ОКО из-за аэродинамического сопротивления и потери массы.

Проведены экспериментальные исследования процесса аэротермомеханического уноса и торможения тел при их движении в атмосфере Земли со сверхзвуковыми скоростями на аэробаллистических установках [19–21]. Объектами испытаний в постановочных опытах на аэробаллистической установке являлись:

– шарики диаметром 10,4 мм, массой 10 г, изготовленные из композитного сплава ВНЖ-90;

– шарики диаметром 13,5 мм, массой 10 г, изготовленные из стали ШХ15.

Указанные объекты отстреливались в свободный полет из легкогазовой баллистической установки со скоростями $V_0 = 5–6,2$ км/с. Дальность свободного полета составляла ≈ 160 м, в процессе полета осуществлялись оптические, рентгенографические и хронографические измерения. Начальная температура объектов соответствовала метеоусловиям на момент проведения опытов ($10–20$ °С).

Во время полета под действием аэродинамического теплового потока (конвективного и излучения) происходит интенсивный нагрев лобовой поверхности объекта. Температура поверхности достигает температуры разрушения материала, и начинается его унос, обуславливающий изменение массы и обводов. По мере торможения тепловые потоки снижаются, унос прекращается, и в дальнейшем обводы объектов уже не меняются, а температура поверхности падает. Отмеченные обстоятельства являются характерными для всех проведенных экспериментов. На рис. 1 представлены результаты регистрации аэрофотокамерами (АФА) полета шарика из ВНЖ на участке траектории, где происходил унос.

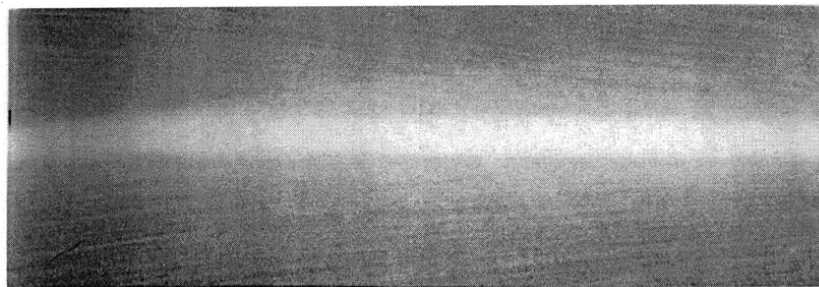


Рис. 1. Регистрация камерой АФА полета шарика из ВНЖ на участке траектории, где происходил унос ($X = 66$ м, $V \approx 4$ км/с)

Характерным является наличие плотного трека светящегося шарика в ореоле расходящихся треков светящихся частиц значительно меньших размеров.

Представленные на рис. 2 рентгеновские снимки различных стадий полета этого шарика (направление полета слева направо) позволяют предложить качественную картину процессов, в том числе и регистрируемых фотокамерами АФА.

В зависимости от материала объектов метания процесс аэротермомеханического уноса при гиперзвуковых скоростях существенно различен.

В процессе уноса на рентгеновских снимках в зоне лобовой поверхности шарика вверх по потоку регистрируется затемненная область с размытой границей. Судя по виду границы, эта область является газообразной и распространяется вниз по потоку до окрестности точки начала резкого расширения потока. Наличие указанной области обусловлено особенностями процесса аэротермомеханического уноса материала сплава ВНЖ и аэробаллистическими условиями полета.

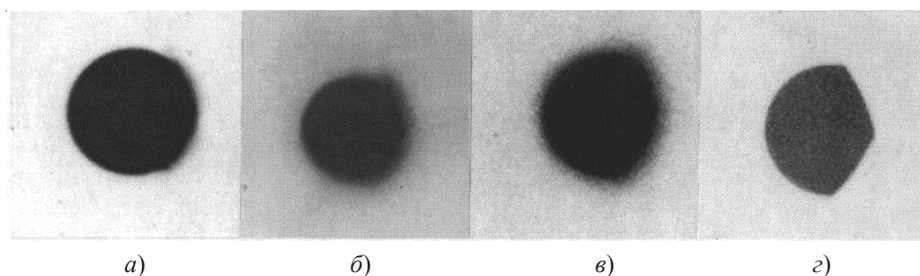


Рис. 2. Рентгеновские снимки шарика из ВНЖ в различных стадиях полета:
 а) $X=14$ м, $V=4,9$ км/с; б) $X=26$ м, $V=4,6$ км/с; в) $X=43$ м, $V=4,1$ км/с;
 г) $X=156$ м, $V=1,5$ км/с

Сплав ВНЖ является композитным материалом, его компоненты имеют отличающиеся теплофизические свойства, в частности температуру плавления. По мере разогрева лобовой части шарика первым начинает плавиться связующее звено железо–никель, температура плавления которого примерно в 2 раза ниже температуры плавления основы – зерен вольфрама. В результате плавления связки зерна вольфрама или их отдельные ассоциации теряют механическую связь между собой и начинают автономное движение в ударном слое. Судя по рентгеновским снимкам, торможение шарика оказывается более интенсивным, и поэтому в относительном движении зерна вольфрама продвигаются вверх по потоку относительно твердой поверхности шарика.

Численные расчеты обтекания шарика с обводами, принятыми на основе рентгеновских снимков, потоком вязкого равновесно-диссоциирующего воздуха показали, что внешняя граница затемненной зоны на рентгеновских снимках в полюсной части практически примыкает к головной ударной волне, то есть зерна вольфрама в этой зоне занимают практически весь объем ударного слоя. Начав автономное движение в ударном слое совместно с газовой фазой, омывающей твердую поверхность, они приобретают составляющую скорости, нормальную к направлению полета. В связи с этим их траектории отклоняются от траектории шарика и формируют ореол треков, регистрируемых фотокамерами.

Процессы, наблюдаемые при полете стального шарика, существенно отличаются от рассмотренных выше. Прежде всего, следует отметить, что трек, регистрируемый фотокамерами, имеет четкие границы и не содержит дополнительных треков каких-либо сопутствующих фрагментов.

Другим важным обстоятельством является пульсирующий характер трека. Периодически происходит увеличение его поперечных размеров (яркости свечения, вспышки). Частота следования участков трека увеличенных размеров и их протяженность не постоянна. Этот процесс характерен только для той части траектории, где происходит унос с поверхности стального шарика. Следует отметить, что на снимках с ракурсами, отличающимися на 90° , один и тот же участок трека фиксируется различным образом. На одном из снимков имеется участок с изменяющейся шириной трека, на другом ширина трека постоянна.

Отмеченные обстоятельства позволяют сформировать качественную схему процессов, реализующихся при полете стального шарика. Сталь, в отличие от сплава ВНЖ, является гомогенным материалом, и по достижении температуры 1540°C она начинает плавиться. С момента прогрева лобовой поверхности до температуры

плавления начинается течение жидкой пленки расплава. При продвижении от полюсного участка лобовой поверхности вниз по потоку происходит снижение уровня тепловых нагрузок и, соответственно, остывание пленки. Поэтому возрастает вязкость расплава, скорость течения пленки падает и происходит формирование наплыва. Накапливающийся расплав периодически срывается с поверхности шара.

В результате срыва капель и их возможного последующего дробления могут интенсифицироваться процессы окисления (горения), что может быть причиной наблюдаемого периодического увеличения ширины (или яркости свечения) трека. Однако это явление может быть обусловлено и соответствующим периодическим увеличением габаритов шарика из-за формирования наплывов. Периодическое формирование наплывов и срыв капель должны происходить в различных меридиональных плоскостях, о чем свидетельствует различный вид одних и тех же участков трека, снятого при различных ракурсах. Это же обстоятельство в объяснении увеличения ширины трека позволяет сделать предположение о влиянии увеличения габаритов шарика из-за наплыва расплава. Если бы причиной было горение капель расплава, сорвавшихся с поверхности шара, то характер оптических эффектов, сопровождающих это явление (увеличение ширины трека), скорее всего, не зависел бы от ракурса наблюдения.

Оба шарика, стальной и из сплава ВНЖ, в конечной стадии полета, когда унос прекратился, имеют подобные обводы, характерные для типичной метеоритной формы.

Эксперименты показывают, что шарики и кубики, не имеющие преимущественной аэродинамической ориентации, в полете оказываются статически устойчивыми и сохраняют ориентацию с момента начала уноса.

Из представленных результатов постановочных экспериментов по исследованию аэротермомеханических процессов, сопутствующих движению тел с гиперзвуковыми скоростями в плотных слоях атмосферы, следует, что в условиях аэробаллистического эксперимента наблюдаются эффекты, сходные с наблюдаемыми эффектами при полете болидов. Это дает основания полагать, что постановкой специальных экспериментов в условиях аэробаллистических установок можно исследовать характеристики процессов, сопровождающих полет объектов из материалов, близких по своим физико-механическим свойствам к материалам опасных космических объектов. Перенос результатов таких исследований на условия полета реального ОКО позволит осуществить оценки его опасности с точки зрения разрушений при выпадении на землю метеоритов и воздействия головной ударной волны, создаваемой ОКО или его фрагментами в процессе полета в атмосфере Земли. На основе таких оценок могут быть сформулированы требования по степени необходимой фрагментации исходного ОКО.

Список литературы

1. Park S.-Y., Ross I.M. Two-body optimization for deflecting Earth-crossing asteroids. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 1999. Vol. 22. No 3. P. 415–420.
2. Hall C.D., Ross I.M. Dynamics and control problems in the deflection of Near-Earth objects. *Advances in the Astronautical Sciences, Astrodynamics*. 1997. 1997. Vol. 97. Part I. P. 613–631.
3. Ross I.M., Park S.-Y., Porter S.E. Gravitational effects of Earth in optimizing Delta-V for deflecting Earth-crossing asteroids. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2001. Vol. 38. No 5. P. 759–764.
4. Yeomans D. Small bodies of the solar system. *Nature*. 2000. Vol. 404. P. 829–832.

5. Дудоров А.Е., Еретнова О.В. Частота падения метеоритов. *Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции. 2–6 июня 2014*. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. С. 22–23.
6. Зайцев А.В., Махутов Н.А., Петров Д.В., Пучков В.А., Симоненко В.А., Таранов А.А., Шубин О.Н. Проблемы и основы создания международной системы планетарной защиты. *Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции. 2–6 июня 2014*. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. С. 24–25.
7. Дегтярь В.Г., Позин Г.Б., Саитгараев С.С. Возможности ракетно-космических комплексов для создания ближнего эшелона системы защиты Земли. *Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции. 2–6 июня 2014*. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. С. 9–10.
8. Авраменко М.И., Глазырин И.В., Ионов Г.В., Карпеев А.В. Расчеты параметров воздушной волны, вызванной Челябинским болидом. *Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции. 2–6 июня 2014*. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. С. 7–8.
9. Левин Б.Ю. *Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе*. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 294 с.
10. Астапович И.С. *Метеорное явление в атмосфере Земли*. М.: Физматгиз, 1958. 634 с.
11. Бронштэн В.А. *Проблемы движения в атмосфере крупных метеоритных тел*. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 124 с.
12. Гроховский В.И. Разрушение метеороидов различного состава и структуры. *Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции. 2–6 июня 2014*. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. С. 19–20.
13. Грязных Д.А., Симоненко В.А., Елсуков В.П., Лебедев С.Н., Литвиненко И.А. Способы ударно-волнового воздействия на опасные космические объекты. *Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции. 2–6 июня 2014*. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. С. 20–21.
14. Ромиг М. Физика входа метеорных тел в атмосферу. *Ракетная техника и космонавтика*. 1965. Т. 3. № 3. С. 3–15.
15. Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. *Аэродинамика болидов*. М.: Наука, Физматлит, 1995. 240 с.
16. Бабаджанов П.Б. *Метеоры и их наблюдение*. М.: Наука, Физматлит, 1987. 176 с.
17. Иванов А.Г., Рыжковский В.А. *Хрупкие разрушения метеороидов в атмосферах планет*. Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2006. 178 с.
18. Ионов Г.В. Расчет движения фрагментов в атмосфере с учетом наблюдательных данных. *Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции. 2–6 июня 2014*. Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. С. 30–31.
19. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Фомкин А.П. Об особенностях расчетно-экспериментальных исследований аэродинамических процессов при гиперзвуковых скоростях обтекания. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2013. Т. 6. №1. С. 34–40.
20. Герасимов С.И., Кикеев В.А., Фомкин А.П. Повышение информативности аэробаллистического эксперимента как мера повышения точности определения коэффициента сопротивления. *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86. №11. С. 125–132.
21. Герасимов С.И., Кикеев В.А., Тотышев К.В., Фомкин А.П., Яненко Б.А. Визуализация сверхзвукового движения сферы в воздухе и в воде. *Научная визуализация*. 2017. Т. 9. №1. С. 1–25.

References

1. Park S.-Y., Ross I.M. Two-body optimization for deflecting Earth-crossing asteroids. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 1999. Vol. 22. No 3. P. 415–420.
2. Hall C.D., Ross I.M. Dynamics and control problems in the deflection of Near-Earth objects. *Advances in the Astronautical Sciences, Astrodynamics 1997*. 1997. Vol. 97. Part I. P. 613–631.
3. Ross I.M., Park S.-Y., Porter S.E. Gravitational effects of Earth in optimizing Delta-V for deflecting Earth-crossing asteroids. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2001. Vol. 38. No 5. P. 759–764.

4. Yeomans D. Small bodies of the solar system. *Nature*. 2000. Vol. 404. P. 829–832.
5. Dudorov A.E., Eretnova O.V. Chastota padeniya meteoritov [The frequency of meteorite falls]. *Zababakhinskie nauchnye chteniya: sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy konferentsii. 2–6 iyunya 2014* [Zababakhin Scientific Talks: Proceedings of the XII International Conference. 2–6 June 2014]. Snezhinsk. RFNC–VNIITF Publ. 2014. P. 22–23 (In Russian).
6. Zaitsev A.V., Makhutov N.A., Petrov D.V., Puchkov V.A., Simonenko V.A., Taranov A.A., Shubin O.N. Problemy i osnovy sozdaniya mezhdunarodnoy sistemy planetarnoy zashchity [Problems and bases for the creation of the international planetary defence system]. *Zababakhinskie nauchnye chteniya: sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy konferentsii. 2–6 iyunya 2014* [Zababakhin Scientific Talks: Proceedings of the XII International Conference. 2–6 June 2014]. Snezhinsk. RFNC–VNIITF Publ. 2014. P. 24–25 (In Russian).
7. Degtiar V.G., Pozin G.B., Saitgaraev S.S. Vozmozhnosti raketno-kosmicheskikh kompleksov dlya sozdaniya blizhnego eshelona sistemy zashchity Zemli [The possibilities of space-rocket complexes to create a middle tier system for the protection of the Earth]. *Zababakhinskie nauchnye chteniya: sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy konferentsii. 2–6 iyunya 2014* [Zababakhin Scientific Talks: Proceedings of the XII International Conference. 2–6 June 2014]. Snezhinsk. RFNC–VNIITF Publ. 2014. P. 9–10 (In Russian).
8. Avramenko M.I., Glazyrin I.V., Ionov G.V., Karpeev A.V. Raschety parametrov vozduшной volny, vyzvannoy Chelyabinskim bolidom [Calculations of the air wave parameters caused by the Chelyabinsk fire-ball]. *Zababakhinskie nauchnye chteniya: sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy konferentsii. 2–6 iyunya 2014* [Zababakhin Scientific Talks: Proceedings of the XII International Conference. 2–6 June 2014]. Snezhinsk. RFNC–VNIITF Publ. 2014. P. 7–8 (In Russian).
9. Levin B.Yu. *Fizicheskaya teoriya meteorov i meteornoё veshchestvo v Solnechnoy sisteme* [Physical Theory of Meteors and Meteoric Matter in the Solar System]. Moscow. AS USSR Publ. 1956. 294 p. (In Russian).
10. Astapovich I.S. *Meteornoё yavlenie v atmosfere Zemli* [Meteor Phenomenon in the Atmosphere]. Moscow. Fizmatgiz Publ. 1958. 634 p. (In Russian).
11. Bronshten V.A. *Problemy dvizheniya v atmosfere krupnykh meteoritnykh tel* [Problems of Motion in the Atmosphere of Large Meteorite Bodies]. Moscow. AS USSR Publ. 1963. 124 p. (In Russian).
12. Grokhovskii V.I. Razrushenie meteoroidov razlichnogo sostava i struktury [Destruction of meteoroids of different composition and structure]. *Zababakhinskie nauchnye chteniya: sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy konferentsii. 2–6 iyunya 2014* [Zababakhin Scientific Talks: Proceedings of the XII International Conference. 2–6 June 2014]. Snezhinsk. RFNC–VNIITF Publ. 2014. P. 19–20 (In Russian).
13. Griaznykh D.A., Simonenko V.A., Elsukov V.P., Lebedev S.N., Litvinenko I.A. Sposoby udarno-volnovogo vozdeystviya na opasnye kosmicheskie ob'ekty [Methods of shock wave impact on dangerous space objects]. *Zababakhinskie nauchnye chteniya: sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy konferentsii. 2–6 iyunya 2014* [Zababakhin Scientific Talks: Proceedings of the XII International Conference. 2–6 June 2014]. Snezhinsk. RFNC–VNIITF Publ. 2014. P. 20–21 (In Russian).
14. Romig M. Fizika vkhoda meteornykh tel v atmosferu [Physics of entrance of meteor bodies into the atmosphere]. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika* [AIAA Journal: Devoted to Aerospace Research and Development]. 1965. Vol. 3. No 3. P. 3–15 (In Russian).
15. Stulov V.P., Mirskii V.N., Vislyi A.I. *Aerodinamika bolidov* [The Aerodynamics of the Fire-ball]. Moscow. Nauka, Fizmatlit Publ. 1995. 240 p. (In Russian).
16. Babadzhanov P.B. *Meteory i ikh nablyudenie* [Meteors and Their Observation]. Moscow. Nauka, Fizmatlit Publ. 1987. 176 p. (In Russian).
17. Ivanov A.G., Ryzhanskii V.A. *Khrupkie razrusheniya meteoroidov v atmosferakh planet* [Brittle Fracture of Meteoroids in the Atmospheres of the Planets]. Sarov. RFNC–VNIIEF Publ. 2006. 178 p. (In Russian).
18. Ionov G.V. Raschet dvizheniya fragmentov v atmosfere s uchetom nablyudatel'nykh dannyykh [Calculation of movement of fragments in the atmosphere taking into account observational data]. *Zababakhinskie nauchnye chteniya: sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy konferentsii. 2–6 iyunya 2014* [Zababakhin Scientific Talks: Proceedings of the XII International Conference. 2–6 June 2014]. Snezhinsk. RFNC–VNIITF Publ. 2014. P. 30–31 (In Russian).

19. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Ob osobennostyakh raschetno-eksperimental'nykh issledovaniy aerodinamicheskikh protsessov pri giperzvukovykh skorostyakh obtekaniya [On specific features of numerical and experimental investigation of aerodynamic processes at hypersonic flow velocity]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics]. 2013. Vol. 6. No 1. P. 34–40 (In Russian).
20. Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Increasing the informative character of aero-ballistic experiment for increasing accuracy of determination of the drag coefficient. *Technical Physics*. 2016. Vol. 61. No 11. P. 1729–1736.
21. Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Totyshev K.V., Fomkin A.P., Yanenko B.A. Vizualizatsiya sverkhzvukovogo dvizheniya sfery v vozdukh i v vode [Visualization of supersonic motion of a sphere in air and in water]. *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization]. 2017. Vol. 9. No 1. P. 1–25 (In Russian).

TWO MECHANISMS OF AEROTHERMOMECHANICAL DESTRUCTION AT HYPERSONIC VELOCITIES IN AIR

**Gerasimov S.I.^{1,2,3,4}, Erofeev V.I.^{3,5}, Kikeev V.A.^{3,4},
Fomkin A.P.², Yanenko B.A.¹, Gerasimova R.V.¹**

¹ *Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Nizhni Novgorod Region, Russian Federation*

² *Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhni Novgorod Region, Russian Federation*

³ *Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences–Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

⁴ *Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

⁵ *Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The issues of protecting the Earth from the collision with space objects are considered. The effectiveness of various methods of crushing such space objects, to alleviate the detrimental effects of their falling onto the Earth, are analyzed. In the framework of the task, the problem of experimentally studying aerothermomechanical carryover at the initial stage of the acceleration of a model of a meteorite at hypersonic velocities in the conditions of intensive background radiation is solved. Based on x-ray pictures and photographs of a body moving through the Earth's atmosphere at hypersonic velocities, a qualitative picture of the aerothermomechanical carryover and the deceleration of steel balls and balls made of a composite wolfram-nickel-iron alloy is presented. The processes observed during the motion of the steel balls and the balls of the composite alloy are shown to differ in their character. Their motion under the effect of the heat flow (convective or radiation) is accompanied by intensive heating of the frontal surface of the objects, followed by its carryover, which results in the changes of its mass and outline. During the motion from the polar part of the frontal surface along the flow, the level of thermal loading decreases and, hence, the film cools down. Accordingly, the viscosity of the melt increases, the flow rate of the film decreases, and a burl is formed. The accumulating melt periodically drops from the body surface. In the process of deceleration the flows decrease, the carryover stops, after which the outline of the objects no longer changes, and the surface temperature drops. For the steel balls, the carryover results from melting through the outer layer and drop losing. The carryover mechanism in the balls of the wolfram-nickel-iron alloy is connected with the different melting temperatures of its components and results in the motion of the wolfram particles in the direction normal to the direction of the motion of the body.

Keywords: aero-thermo-mechanical ablation, aeroballistic experiment, X-ray imaging.